Übersicht der QCD-Tests

- Existenz der Farbladung
- Existenz des Gluons
- Laufen der (renormierten) Kopplungskonstanten
- Gruppen- oder Strukturkonstanten: Farbfaktoren
- Drei-Gluon-Kopplung 
- Flavourunabhängigkeit der starken Kopplung
- Laufen der (renormierten $\overline{MS}$-) Quarkmassen
- Quark-Gluon-Unterschiede

Bestimmung der Farbfaktoren

Zur Erinnerung: Die Farbfaktoren spielen neben der Kopplungskonstanten α_s eine Rolle bei der Beschreibung der Wechselwirkungsstärke zwischen Quarks & Gluonen:

$^2 \sim \alpha_s \cdot C_F$ $\quad$ C_F findet sich bereits im 3-Jet-Matrixelement $\frac{1}{\sigma_0}\frac{d^2\sigma}{dx_{\bar q}\,dx_q} = C_F \cdot \alpha_s \cdot \ldots$

Die Quark-Antiquark-Aufspaltung eines Gluons:

$^2 \sim \alpha_s \cdot T_R \cdot n_f$ $\quad$ für n_f verschiedene Quarkflavourfreiheitsgrade

Der wichtigste Unterschied zw. QED & QCD liegt in der Gluon-Selbstwechselwirkung (Grund dafür ist die nicht-abelsche Struktur der QCD):

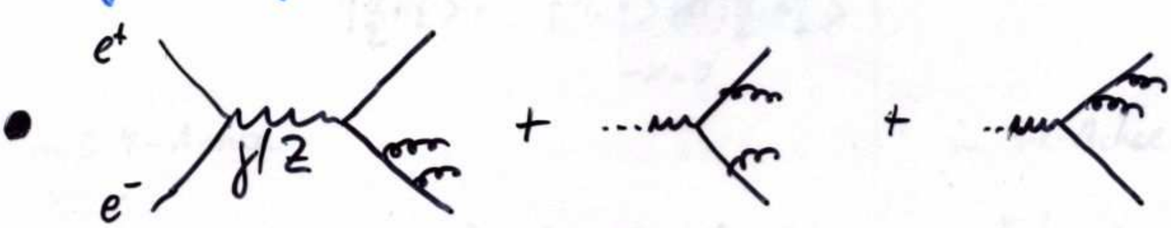
$^2 \sim \alpha_s \cdot C_A$

Die Gruppenstruktur der QCD sagt voraus: $C_F = \frac{4}{3}$, $C_A = 3$, $T_R = \frac{1}{2}$

Zur Bestätigung der QCD als Theorie der starken Ww. müssen diese Farbfaktoren im Experiment gemessen und insbesondere die Existenz der Drei-Gluon-Kopplung nachgewiesen werden.

Farbfaktoren, Drei-Gluon-Kopplung

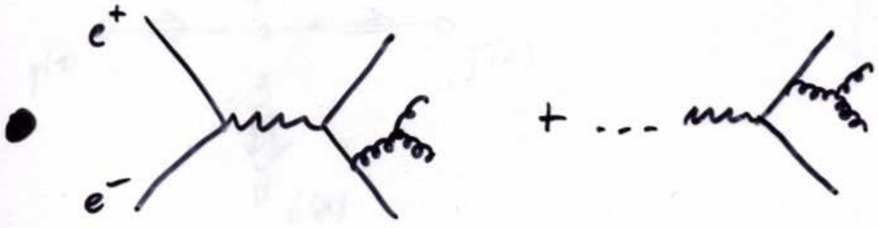
Während  bereits in niedrigster, nicht-trivialer Ordnung in e^+e^--Vernichtung auftritt, können die beiden Grafen  und  nur in der nächsthöheren Ordnung $O(\alpha_s^2)$ beobachtet werden. In dieser Ordnung treten insgesamt 4 Partonen ($\hat{=}$ Quarks & Gluon) gemäß des folgenden Grafen auf:

- 

Doppelbremsstrahlung von Gluonen

- 

Gluonsplitting in Quark-Antiquark

- 

Triple-Gluon-Vertex

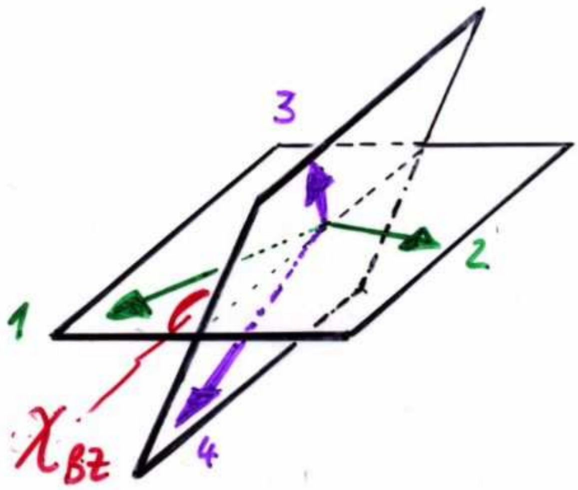
Um den Triple-Gluon-Vertex zu identifizieren, muss man diese drei Klassen voneinander trennen. Da man i.A. Quark- und Gluon induzierte Jets nicht unterscheiden kann, nutzt man die unterschiedlichen Spins von Quark & Gluon zur Trennung der drei Klassen aus.

Trennung von , ,

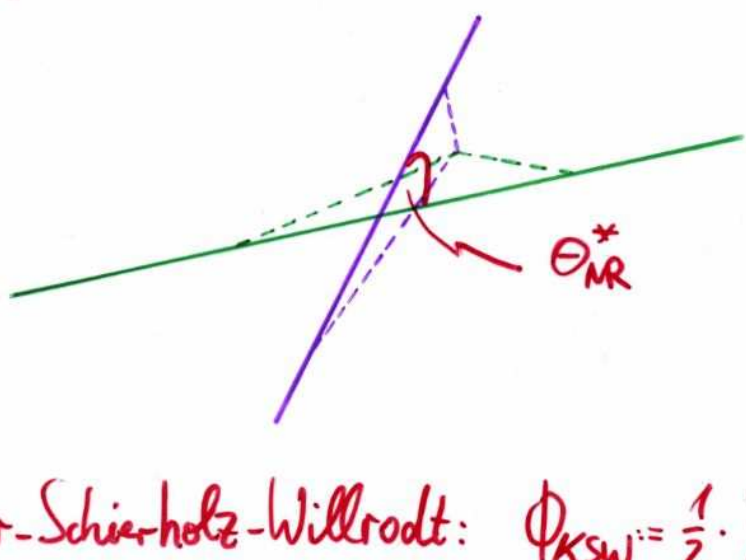
Idee: Messe die relative Orientierung der Ebenen von den primären $q\bar{q}$- zu den sekundären $q'\bar{q}'$ oder GG-Jets.

z.B.:

- Bengtsson-Zerwas-Winkel: $\chi_{BZ} := \sphericalangle\left[(\vec{p}_1 \times \vec{p}_2), (\vec{p}_3 \times \vec{p}_4)\right]$



- Nachtmann-Reiter-Winkel: $\Theta^*_{NR} := \sphericalangle\left[(\vec{p}_1 - \vec{p}_2), (\vec{p}_3 - \vec{p}_4)\right]$



- Körner-Schierholz-Willrodt: $\Phi_{KSW} := \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sphericalangle\left[(\vec{p}_1 \times \vec{p}_4), (\vec{p}_2 \times \vec{p}_3)\right] + \sphericalangle\left[3 \leftrightarrow 4\right] \right\}$
- Winkel zw. Jets 3 und 4: $\alpha_{34} := \sphericalangle\left[\vec{p}_3, \vec{p}_4\right]$

Experimentelle Hürden

- Man kann primäre $q\bar{q}$ und sekundäre $q'\bar{q}'$ bzw. GG nicht unterscheiden!

  Lösung: Im Mittel sind die primären $q\bar{q}$ höher energetisch als die sekundären $q'\bar{q}'$ bzw GG. Ordne daher Jets nach abnehmender Energie als Jet 1, 2, 3, 4.

- Im Experiment werden Hadronen beobachtet, keine Quarks oder Gluonen!

  Lösung: Fasse eng benachbarte Hadronen zu Teilchenbündel (den Jets) zusammen, deren Energie & Impuls mit Energie und Impuls der ursprünglichen Quarks bzw. Gluonen assoziiert werden.

Jetalgorithmen

... fassen Hadronen systematisch zu Teilchenbündel zusammen. Viele verschiedene Algorithmen existieren. Eine große Klasse davon nutzt eine Vorschrift, die vom JADE-Experiment erstmals eingesetzt wurde, den JADE-Algorithmus:

(i) Berechne Abstand y_{ij} zwischen allen Teilchen

$$y_{ij} := \frac{2E_i \cdot E_j}{s} \cdot \left(1 - \cos\sphericalangle(i,j)\right)$$

(ii) Finde kleinsten Abstand $y_{min} := \min_{i,j}(y_{ij})$.
Falls

$$y_{min} > y_{cut}$$

für vorgegebenen Jetauflösungsparameter y_{cut}, dann sind die verbliebenen (Pseudo-)teilchen die gesuchten Jets. Sonst ...

(iii) Rekombiniere die (Pseudo-)teilchen i und j zu

$$E_k = E_i + E_j$$

$$\vec{p}_k = \vec{p}_i + \vec{p}_j$$

wonach Pseudoteilchen k die Teilchen i und j ersetzt. Dann wiederhole (i) – (iii) bis $y_{min} > y_{cut}$.

Jetalgorithmen auf Basis des JADE-Algorithmus

Algorithmus ↓ | Abstandsmaß ↓ | Rekombinations= vorschrift ↓

Table 5
Definition of the resolution parameters and recombination prescriptions for various frequently used jet algorithms. Energy and three-momentum of jets are indicated as E and p, respectively, while upright boldface variables denote four-vectors. The centre-of-mass energy is $\sqrt{s}$, but often the total visible energy is used instead in experiments. For massless quarks the E0- and JADE-algorithms are identical in second-order perturbation theory. The C-algorithm has a two-stage resolution criterion which is described in the text

Algorithm	Resolution parameter	Recombination	Remarks	Theory
E	$y_{ij} = \frac{(\mathrm{p}_i + \mathrm{p}_j)^2}{s}$	$\mathrm{p}_k = \mathrm{p}_i + \mathrm{p}_j$	Lorentz invariant	NLO
E0	$y_{ij} = \frac{(\mathrm{p}_i + \mathrm{p}_j)^2}{s}$	$E_k = E_i + E_j$ $p_k = E_k \cdot \frac{p_i + p_j}{\lvert p_i + p_j \rvert}$	Conserves $\sum E$, Violates $\sum p$	NLO
JADE	$y_{ij} = \frac{2E_iE_j(1-\cos\theta_{ij})}{s}$	$E_k = E_i + E_j$ $p_k = p_i + p_j$	Conserves $\sum E$, $\sum p$	NLO
P	$y_{ij} = \frac{(p_i + p_j)^2}{s}$	$p_k = p_i + p_j$ $E_k = \lvert p_k \rvert$	Conserves $\sum p$, Violates $\sum E$	NLO
P0	$y_{ij} = \frac{(p_i + p_j)^2}{s}$	$p_k = p_i + p_j$ $E_k = \lvert p_k \rvert$	As p-scheme, but $\sum E$ updated after each recombination	NLO
D, k_t	$y_{ij} = \frac{2\min(E_i^2, E_j^2)(1-\cos\theta_{ij})}{s}$	$E_k = E_i + E_j$ $p_k = p_i + p_j$	Conserves $\sum E$, $\sum p$; avoids exp. problems	NLO + NLLA
G	$y_{ij} = \frac{8E_iE_j(1-\cos\theta_{ij})}{9(E_i+E_j)^2}$	$\mathrm{p}_k = \mathrm{p}_i + \mathrm{p}_j$	Conserves $\sum E$, $\sum p$; avoids exp. problems	NLO
C	$v_{ij} = 2(1-\cos\theta_{ij})$ $y_{ij} = \min(E_i^2, E_j^2)v_{ij}$	$E_k = E_i + E_j$ $p_k = p_i + p_j$	Conserves $\sum E$, $\sum p$; accounts for angular ordering	NLO + NLLA

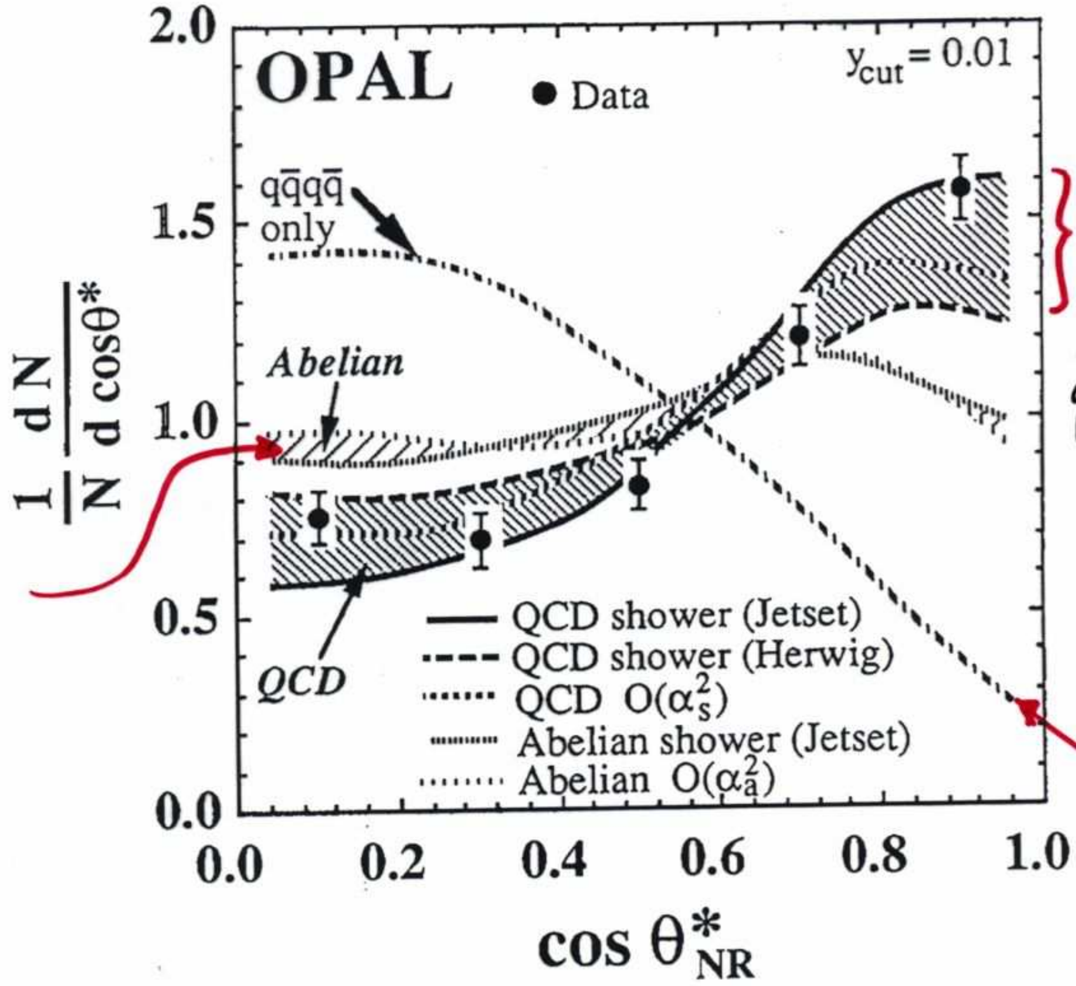
p_i ≙ Vierervektor

p_i ≙ Dreiervektor

Existenz des Drei-Gluon-Vertex

am Beispiel des Nachtmann-Reiter-Winkels:

Erwartung falls keine Drei-Gluon-Kopplung



QCD-Erwartung inkl. Effekte durch Hadronisierung

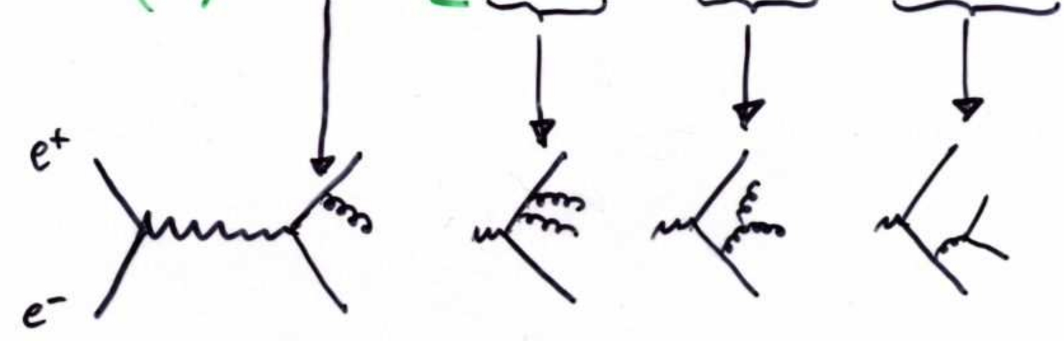
alleiniger Beitrag von $q\bar{q}q'\bar{q}'$

$\Rightarrow$ Drei-Gluon-Kopplung, d.h. Drei-Gluon-Vertex existiert!

Messung der Farbfaktoren

Der differentielle 4-Jet-Wirkungsquerschnitt hat folgende Struktur:

$$d\sigma^{4\text{-Jet}} = \left(\frac{\alpha_s}{2\pi}\right)^2 \cdot C_F \cdot \left[C_F \cdot A + C_A \cdot B + T_R \cdot n_f \cdot C \right]$$



ist also unmittelbar von den Farbfaktoren abhängig. Allerdings können diese nur im Verhältnis zu C_F bestimmt werden, da C_F ein Faktor ist, der global in den 4-Jet-WQ eingeht, d.h.

$$\frac{C_A}{C_F} = \frac{3}{4/3} = \frac{9}{4} = 2.25$$

$$\frac{T_R}{C_F} = \frac{1/2}{4/3} = \frac{3}{8} = 0.375$$

sind die von der QCD vorhergesagten Verhältnisse.

(Zur Erinnerung: QCD hat $SU(3)_{colour}$-Gruppenstruktur

Aus Messung extrahierte Farbfaktorverhältnisse

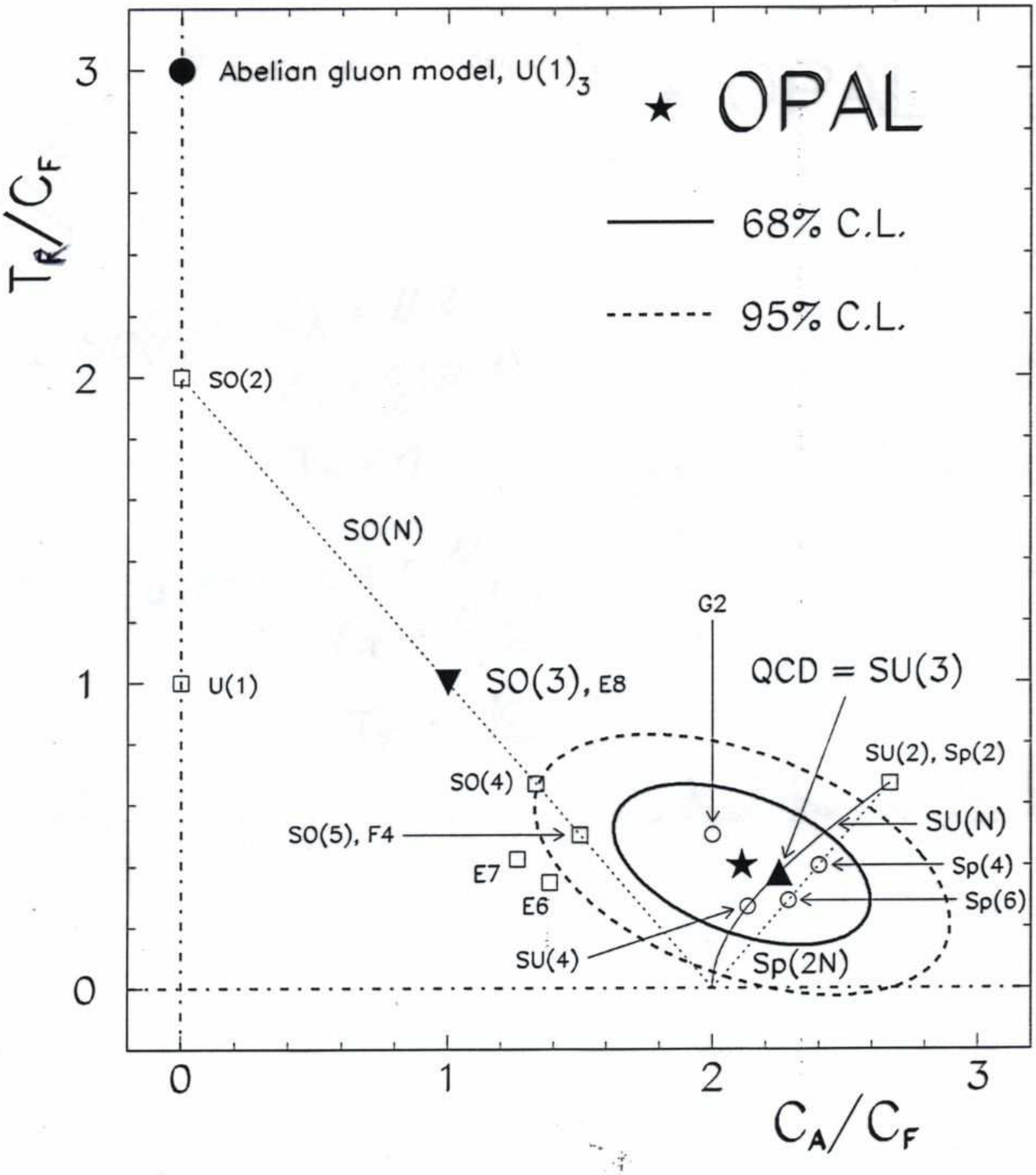
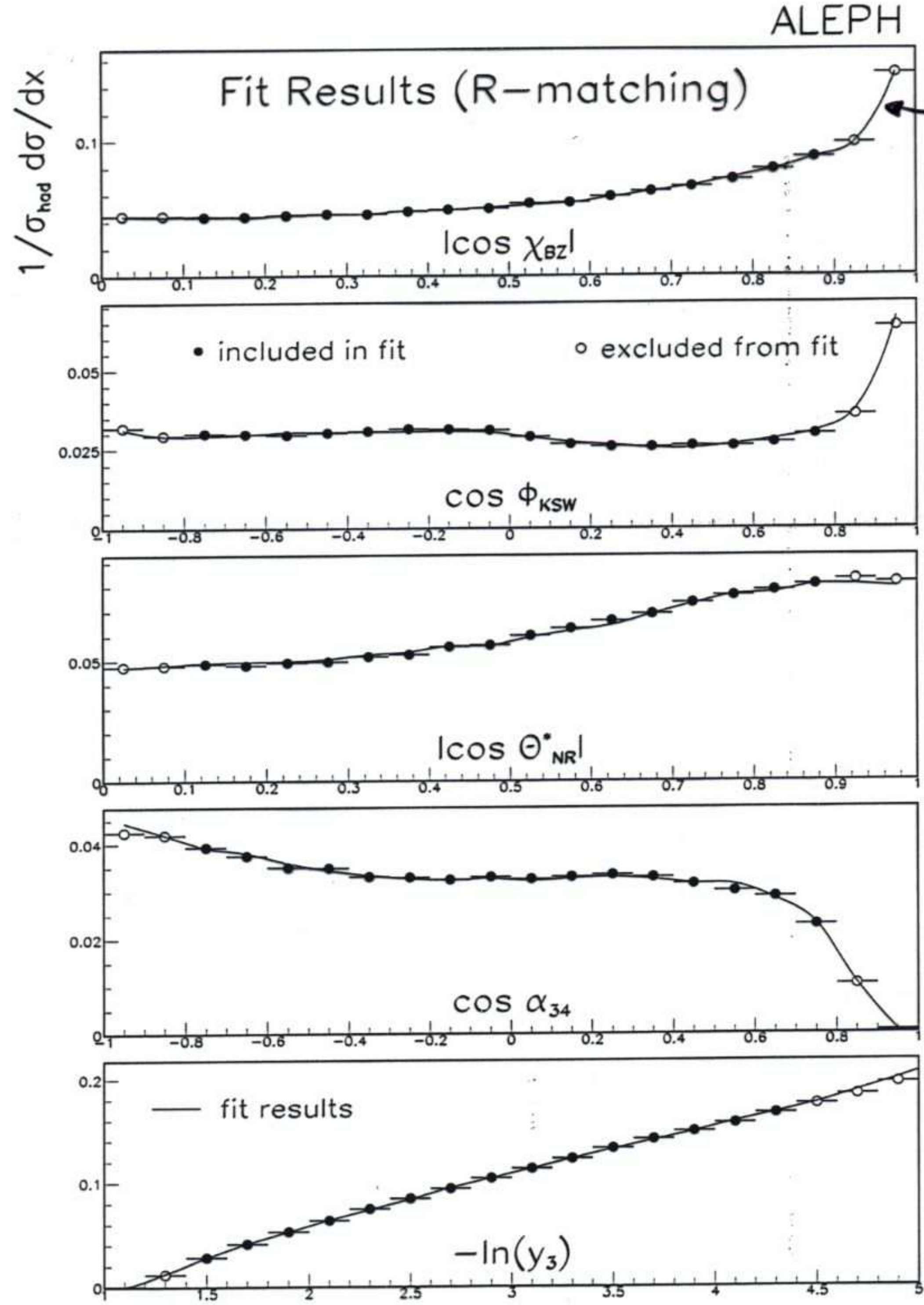


Figure 6: Measured values of colour factor ratios C_A/C_F and T_F/C_F with 68% and 95% confidence-level contours. Expectations from various gauge models are also shown. Those groups shown by the open squares and circles are already excluded because they do not contain three colour degrees of freedom for quarks.

Farbfaktoren aus Winkelverteilungen



Anpassung der Theorie für freie Verhältnisse $\frac{C_A}{C_F}$ und $\frac{T_R}{C_F}$.

Figure 3: Fit results (fit of $\overline{\alpha}_s$, $\dfrac{C_A}{C_F}$ and $n_f\,\dfrac{T_F}{C_F}$, R matching scheme) for all five variables. The statistical error of the data is smaller than the symbol size .

Präzisestes Resultat

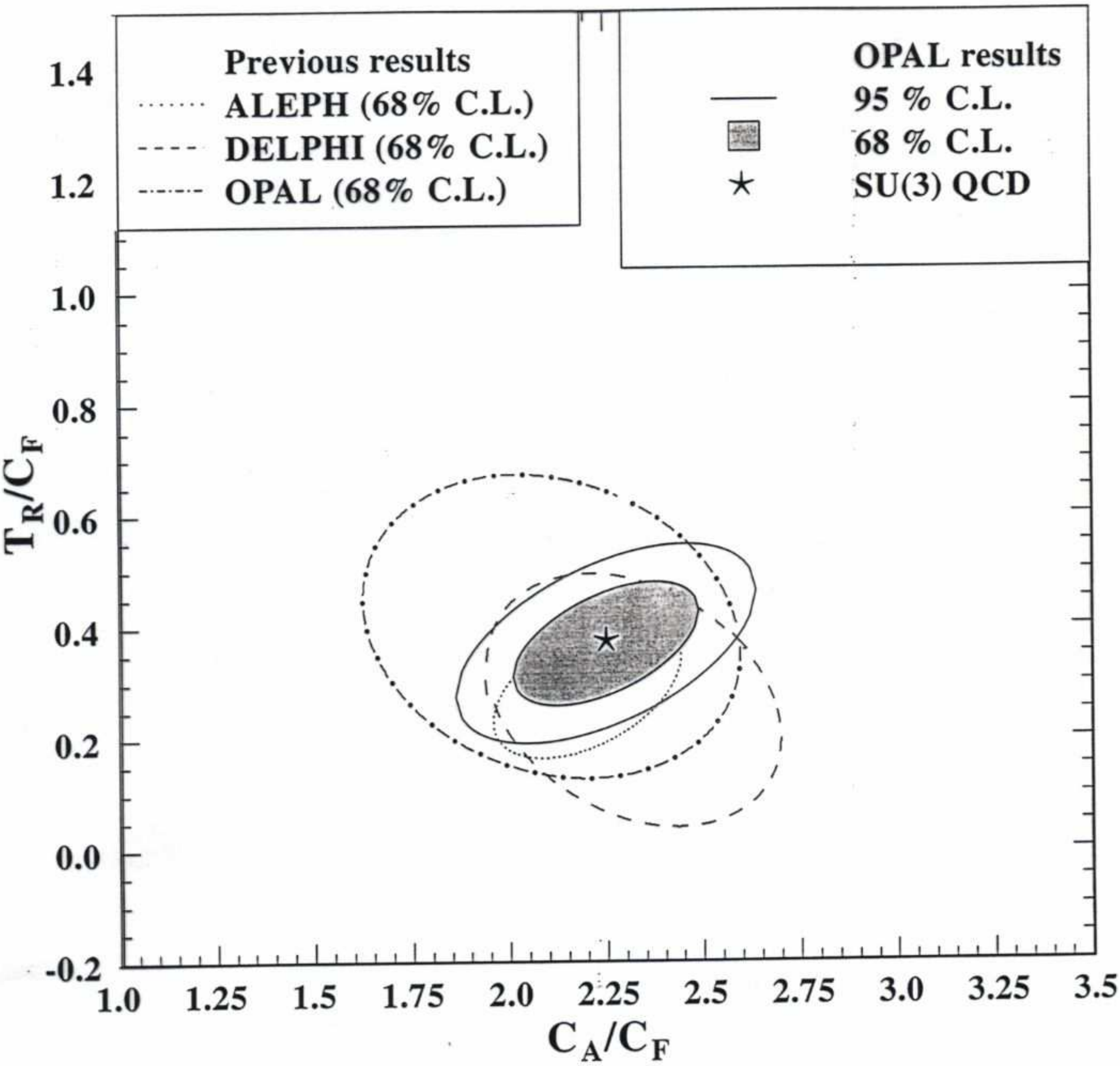


Figure 4: Two dimensional plot of the ratios of the colour factors compared with previous results of the LEP experiments [9, 12, 13]. The legend in the top right corner describes this analysis. The contours are based on total uncertainties.

$$\Rightarrow \begin{cases} \dfrac{C_A}{C_F} = 2.25 \pm 0.16 & (SU(3)\text{-QCD}: 2.25) \\ \dfrac{T_R}{C_F} = 0.37 \pm 0.07 & (SU(3)\text{-QCD}: 0.375) \end{cases}$$

Exp. Bestimmung der Farbfaktoren

Um die absoluten Werte der Farbfaktoren bestimmen zu können, muss man noch Messungen heranziehen, die nur von C_F abhängen bzw. durch C_F-Terme dominiert werden, z.B. Thrust-Verteilungen:

$$\frac{1}{\sigma_0}\frac{d\sigma}{dT} \sim \frac{\alpha_s}{2\pi}\cdot C_F \cdot A(T) + \left(\frac{\alpha_s}{2\pi}\right)^2 \cdot C_F \cdot \left(C_F \cdot A(T) + C_A \cdot B(T) + T_R \cdot n_f C(T)\right)$$

zusammen mit den Winkelverteilungen

$$\frac{1}{\sigma_0}\cdot\frac{d\sigma^{4\text{-Jet}}}{d\Theta} \sim \left(\frac{\alpha_s}{2\pi}\right)^2 \cdot C_F \cdot \left(C_F \cdot A(\theta) + C_A \cdot B(\theta) + T_R \cdot n_f C(\theta)\right)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} C_A = 2.84 \pm 0.24 & (\text{SU(3)-QCD}: 3) \\ C_F = 1.29 \pm 0.18 & (\text{SU(3)-QCD}: 4/3) \end{cases}$$

sowie für T_R

$$T_R = 0.56 \pm 0.14 \qquad (\text{SU(3)-QCD}: 1/2)$$

d.h. Farbfaktoren in Übereinstimmung mit Erwartung für eine QCD mit SU(3)-Gruppenstruktur!

Farbfaktoren

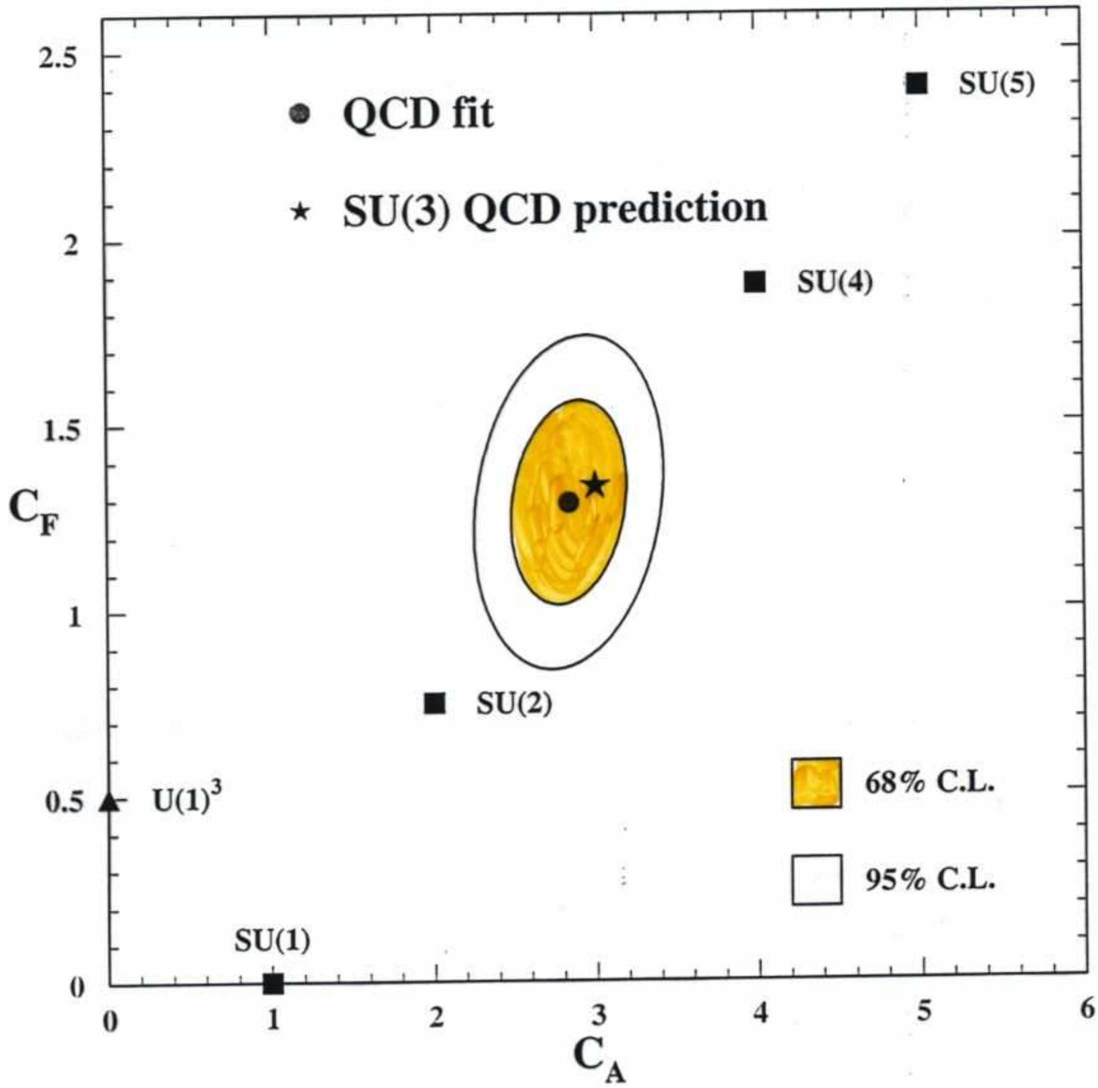


Figure 4: The figure presents the combined results for the colour factors C_A and C_F from fits to $\alpha_s(M_{Z^0})$, C_A and C_F based on the observables $1 - T$ and C. The square and triangle symbols indicate the expectations for C_A and C_F for different symmetry groups.